

# 이동 프레임 음향 홀로그래피를 이용한 주행 중인 차량의 베어링 결함 위치 추정

## Bearing faults localization of a moving vehicle by using a moving frame acoustic holography

전중훈<sup>†</sup> · 박춘수\* · 김양한\* · 고효인\*\* · 유원희\*\*

Jong-Hoon Jeon, Choon-Su Park, Yang-Hann Kim, Hyoin Koh and Wonhee You

**Key Words :** Moving Frame Acoustic Holography(이동 프레임 음향 홀로그래피), Bearing Fault(베어링 결함), Partial field decomposition (부분 음장 분해)

### ABSTRACT

This paper deals with a bearing faults localization technique based on holographic approach by visualizing sound radiated from the faults. The main idea stems from the phenomenon that bearing faults in a moving vehicle generate impulsive sound. To visualize fault signal from the moving vehicle, we can use the moving frame acoustic holography [H.-S. Kwon and Y.-H. Kim, "Moving frame technique for planar acoustic holography," J. Acoust. Soc. Am. 103(4), 1734-1741, 1998]. However, it is not easy to localize faults only by applying the method. This is because the microphone array measures noise (for example, noise from other parts of the vehicle and the wind noise) as well as the fault signal while the vehicle passes by the array. To reduce the effect of noise, we propose two ideas which utilize the characteristics of fault signal. The first one is to average holograms for several frequencies to reduce the random noise. The second one is to apply the partial field decomposition algorithm [K.-U. Nam, Y.-H. Kim, "A partial field decomposition algorithm and its examples for near-field acoustic holography," J. of Acoust. Soc. Am. 116(1), 172-185, 2004] to the moving source, which can separate the fault signal and noise. Basic theory of those methods is introduced and how they can be applied to localize bearing faults is demonstrated. Experimental results via a miniature vehicle showed how well the proposed method finds out the location of source in practice.

### 1. 서 론

차량의 베어링에 발생한 결함은 운전 중 승차감을 떨어뜨린다. 뿐만 아니라 결함이 있는 상태에서 운전을 계속하면 베어링이 파손되고 과도한 마찰로 인해 베어링 주변의 온도가 상승하게 된다. 이는 차축을 변형시키거나 파손시켜 사고를 유발할 수 있다[1]. 이를 방지하기 위해 베어링의 결함을 조기에 발견해야 한다. 그러나 베어링은 차량 하부의 차축과 타이어 사이에 장착되어 있는데 Fig. 1(a)의 사진에서 관찰할 수 있듯이 결함의 크기가 작기 때문에 눈으로 발견하기 힘들다[2]. 따라서 만약 결함이 갖는 다른 특징을 이용할 수 있다면 조기 결함 진단에 도움이 될 것이다. 그 중 한 예가 결함에서 발생하는 물리적인 현상을 이용하는 것이다. Fig. 1(b)는 베어링 외륜에 결함이 발생했을 때 가속도계로 측정된 가속도 신호를 나타낸다[2]. 그림에서도 알 수 있듯이 베어링 결함은 충격 진동을 발생시키고, 이로 인해 충격 소음이 발생한다. 이를 이용해 결함 소리의 공간적인 분포를 측정하여 소음원의 위치를 찾은 후 그 곳을 결함 위치로 추정하는 방법을 생각할 수 있다. 소리의 공간적인 분포를 얻는 대표적인 방법으로는 음

향 홀로그래피 방법[3-7]이 있다. 이는 측정면에서 음압의 공간 분포를 이용하여 측정면 이외의 면에서 음압, 입자 속도, 인텐시티 등을 예측하는 방법이다. 음향 홀로그래피에는 측정 방법에 따라 동시 측정(simultaneous measurement), 단계적 측정(step by step measurement)[8], 연속 주사(continuous scanning)[9-10]로 나뉜다. 이 중 연속 주사를 이용한 음향 홀로그래피(이동 프레임 음향 홀로그래피)를 통해 이동하는 음원에서 방사하는 음장을 가시화할 수 있다. 베어링 결함은 운전 중에 소리를 발생시키므로 결함에 의한 음장 측정 또한 차량이 이동하는 동안 이루어져야 한다. 따라서 이동 프레임 음향 홀로그래피가 베어링 소음을 가시화하기에 적합할 것이다. 본 연구에서는 이동 프레임 음향 홀로그래피를 이용하여 주행 중인 차량의 베어링 결함 위치를 추정하는 방법에 대해 다룬다. 이를 설명하기 위해서는 이동

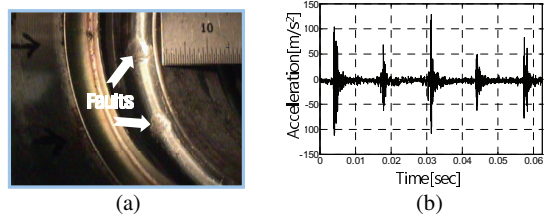


Fig. 1 (a) Faults in an outer bearing of a car, and (b) acceleration of the bearing with fault measured by an accelerometer [2].

<sup>†</sup> 한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동 제어 연구 센터  
E-mail : echovel@kaist.ac.kr  
Tel : (042) 350-3064, Fax : (042) 350-8220  
\* 한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동 제어 연구 센터  
\*\* 한국철도기술연구원

프레임 음향 홀로그래피의 기본 이론 및 적용 가능 대상에 대해 살펴보고, 이 방법을 이용하여 베어링 결함의 위치를 찾는데 발생하는 문제점을 파악하고 해결해야 한다. 이를 위해서는 우선 신호의 모델링을 통해 베어링 결함 신호의 특성을 파악할 필요가 있다.

## 2. 이동하는 차량에서 발생하는 베어링 결함 신호의 특징

### 2.1 베어링 결함 신호의 수학적 표현

베어링 결함은 충격 소음을 유발하고, 이는 베어링이 회전하는 동안 반복하여 발생한다. 만약 베어링이 일정한 속도로 회전하면 충격 소음은 일정한 주기를 갖게 된다. 따라서 본 연구에서는 베어링 결함 신호를 정속도로 이동하는 차량에서 발생한 주기적인 충격 신호로 정의한다. 이를 바탕으로 결함 신호를 수학적으로 표현하기 위해 우선 필요한 변수들을 정의할 필요가 있다. 간단한 경우로 결함이 1 개인 경우를 생각해 보자. 편이상 결함에 의한 충격이  $t=0$  의 시간에 발생하고, 이러한 충격이  $\Delta T$  의 주기를 가지고 반복된다고 하면, 결함이 발생시키는 충격력은

$$F(t) = F_0 \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t - i\Delta T) \quad (1)$$

과 같이 표현할 수 있다. 여기서  $\delta(\bullet)$  은 디랙 델타(Dirac Delta) 함수를 뜻하며,  $F_0$  은 충격량을 뜻한다. 식 (1)에 표현된 충격력에 의해 결함 부위는 차량과 함께 정속도로 이동하면서 충격음을 발생시킨다. 이를  $(x_m, y_m, z_m)$  의 위치에 있는 마이크로폰으로 측정한다고 생각하자(Fig. 2).  $t = i\Delta T$  의 시간에 충격음이 발생하는 순간 결함과 마이크로폰 사이의 거리를  $r_{mi}$  라고 하고, 결함에서 발생한 충격음은 단극 음원의 형태로 방사한다고 가정하면 마이크로폰에서 측정된 음압  $p(x_m, y_m, z_m; t)$  는

$$p(x_m, y_m, z_m; t) = F_0 h(t) * \sum_{i=-\infty}^{\infty} \frac{1}{r_{mi}} \delta(t - (i\Delta T + \frac{r_{mi}}{c})) \quad (2)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서  $c$  는 소리의 전파 속도를 뜻한다.  $h(t)$  는 베어링의 충격 응답 함수이며, 단위 충격력이 가해 졌을 때 단극 음원의 응답을 나타낸다. 간단한 경우로 결함이 있는 베어링이  $f_r$  의 공진 주파수

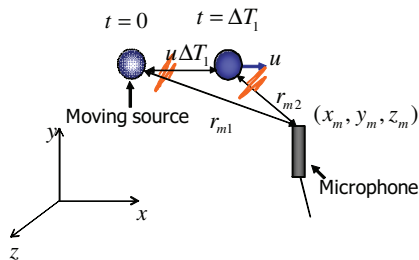


Fig. 2 Schematic diagram of a microphone and a sound source moving with speed  $u$

와 시상수  $\tau$  를 가질 때 충격 응답 함수는

$$h(t) = \begin{cases} \frac{H_0}{\tau} e^{-\frac{1}{\tau} + j2\pi f_r t} & t \geq 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

과 같이 모델링 할 수 있다. 여기서  $H_0$  는 단위 충격량에 의해 발생하는 소음원을 단극음원으로 가정하였을 때의 음원의 크기를 나타낸다. 베어링과 같이 강체로 된 시스템의 충격 응답 함수는 빠른 속도로 감소한다[11-12]. 따라서 본 연구에서는 시상수  $\tau$  가 매우 작다고 가정한다. 즉, 다음 식에 의해 정의되는  $h_0(t)$  를 충격 응답 함수로 사용한다:

$$h_0(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} h(t). \quad (4)$$

이러한 가정에 의하면 충격 응답 함수는 디랙 델타 함수와 같은 형태를 갖게 된다.

### 2.2 베어링 결함 신호의 특징

식 (2)를 살펴 보면 두 가지 특징을 관찰할 수 있다. 이들은 모두 시간에 따라 음원과 마이크로폰 사이의 거리가 달라지기 때문에 발생하는 현상이다. 우선  $1/r_{mi}$  는 충격 신호가 발생할 때 마다 측정되는 충격 신호의 크기가 달라짐을 뜻한다. 두 번째로  $r_{mi}/c$  는 마이크로폰에 측정되는 충격 신호들의 시간 지연이 일정하지 않음을 나타낸다. Fig. 3(a)는 이동하는 주기적인 충격 음원에 의해 방사된 신호를 정지해 있는 마이크로폰을 통해 측정된 신호의 한 예이며, 앞서 언급한 특징을 표현해 준다.

음원의 이동에 의한 결함 신호의 특징은 주파수 영역에서도 관찰할 수 있다. Fig. 3(b)는 식 (2)의 푸리에 변환 결과의 절대값을 보여 준다. 주기가  $\Delta T$  인 주기적인 충격 신호를 푸리에 변환하면  $1/\Delta T$  의 배수에 해당하는 주파수를 갖는 순음 성분의 조합으로 표현된다[13]. 이와는 달리 Fig. 3(b)는 좁은 밴드들의 조합으로 표현됨을 알 수 있다. 이가 갖는 의미는 Fig. 4로 설명할 수 있다. Fig. 4(a)는 Fig. 3(b)를 각 밴드별로 분리하여 표현한 결과다. 그리고 Fig. 4(a)의 우변의 그림에 해당하는 신호들을 각각 역푸리에 변환하면 Fig. 4(b)의 우변과 같이 표현된다. 이는 각각 단일 주파수를 갖는 순음 성분들이 음원의 이동으로 인해 도플러 변조된 신호들이며, 이들의 조합으로 Fig. 4(b)의 좌변이 표현된다. 정리하면,

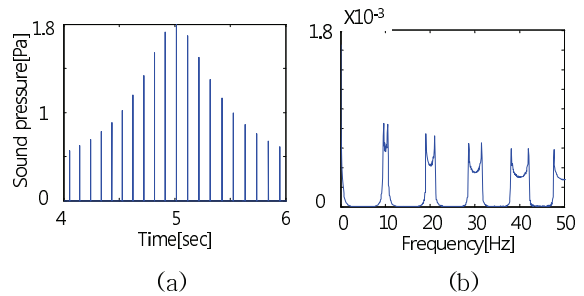


Fig. 3 Moving periodic impulsive signals in (a) time domain and in (b) frequency domain.

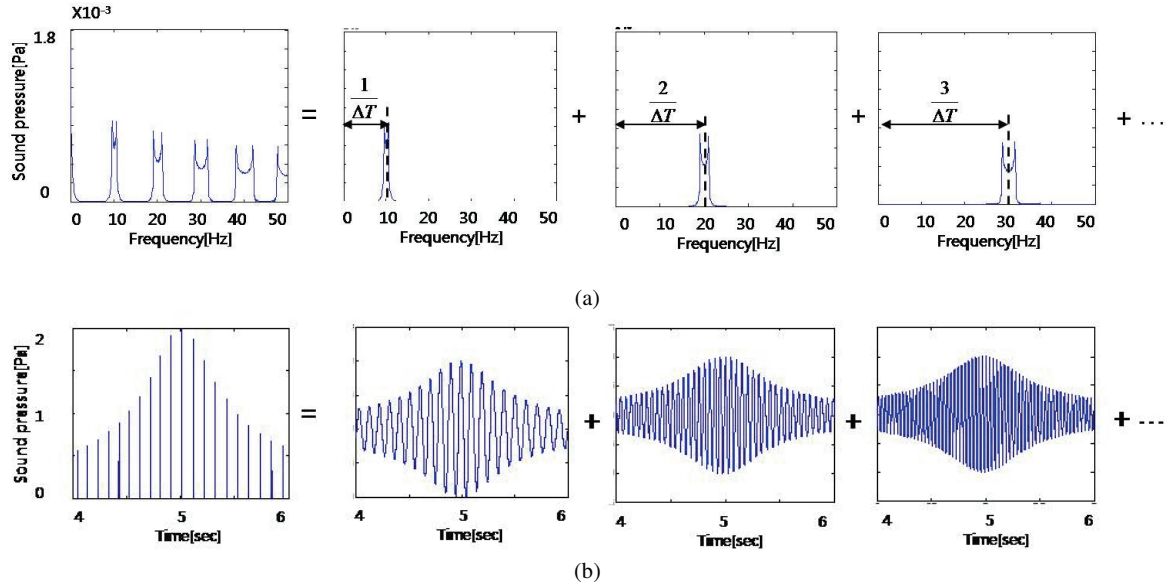


Fig. 4. Expression of moving periodic impulsive signals by using combination of moving pure tone signals in (a) frequency domain, and (b) time domain

이동하는 주기적인 충격 소음은 이동하는 순음 성분들의 조합으로 표현할 수 있다.

### 3. 베어링 결함 신호의 홀로그램 취득 방법

#### 3.1 이동 프레임 음향 홀로그래피의 기본 이론[9-10]

2 장에서 결함 신호의 특성에 대해 살펴보았으므로 이제 이를 이용하여 결함의 위치를 찾는 방법에 대해 살펴보자. 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법은 이동하는 순음 또는 협대역 음원에서 방사한 음압을 정지해 있는 마이크로폰 어레이로 측정 후, 도플러 효과를 제거하여 음장을 가시화하는 방법이다. 본 방법에 의하면 Fig. 5 의 지면에 고정된 마이크로폰 어레이를 이용하여 양의  $x$  방향으로  $u$  의 속도로 이동하는 음원면(source plane) 상에서의 음압을 가시화할 수 있다. 이를 위하여 본 방법은 2 개의 좌표계를 설정한다: 하나는 마이크로폰과 함께 지면에 고정된 고정 좌표계(fixed coordinate)이며, 두 번째 좌표계는 음원면과 함께 이동하는 홀로그램 좌표계(hologram coordinate)이다(Fig. 5 참조).

우선  $p_{f_{h_0}}(x_m, y_m, z_m; t)$  를 순음 성분  $f_{h_0}$  를 갖는 이동하는 소음원으로부터 방사된 소리를  $t$  의 시간에  $(x_m, y_m, z_m)$  의 위치에서 측정된 신호라고 하자. 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법에 의하면 고정 좌표계

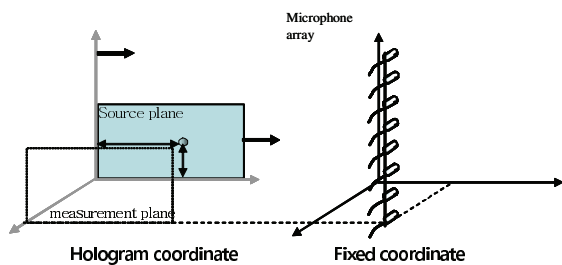


Fig. 5. Pictorial expression of the moving sound source and fixed microphone array

상의 음압  $p_{f_{h_0}}(x_m, y_m, z_m; t)$  는 홀로그램 좌표계 상에서 관찰한 음압과 다음의 관계를 가진다[10]:

$$p_{f_{h_0}}(x_m, y_m, z_m; t) / \Delta f = P_h(x_h, y_h, z_h; f_{h_0}) e^{-j2\pi f_{h_0} t} \quad (5)$$

여기서  $\Delta f$  는 측정된 신호의 주파수 분해능 (frequency resolution)을 뜻하며,  $P_h(x_h, y_h, z_h; f_{h_0})$  는 홀로그램 면에서 관찰한 음압의 푸리에 변환 즉, 홀로그램을 뜻한다. 즉, 주파수  $f_{h_0}$  의 값을 알고 있다면 식 (5)의 양변에  $e^{j2\pi f_{h_0} t}$  을 곱한 후, 시간에 따른  $x_h$  방향 좌표 값을 이용하여 공간 신호로 변환하면 주파수  $f_{h_0}$  에서의 홀로그램  $P_h(x_h, y_h, z_h; f_{h_0})$  즉, 홀로그램을 얻을 수 있고, 음원이 있는 위치에서 음압이 가장 크기 때문에 음원의 위치를 알아낼 수 있다.

#### 3.2 베어링 결함 신호를 가시화하는 방법

그러면 위의 방법을 이용하여 결함 신호의 홀로그램을 얻는 방법을 알아보자. 이동하는 주기적인 충격 신호는 이동하는 순음 성분의 조합으로 표현할 수 있기 때문에 다음과 같이 수학적으로 표현할 수 있다:

$$P(x_m, y_m, z_m; f) = \sum_{i=1}^{\infty} P_{f_{h_i}}(x_m, y_m, z_m; f) \quad (6)$$

여기서  $P(x_m, y_m, z_m; f)$ ,  $P_{f_{h_i}}(x_m, y_m, z_m; f)$  는 측정된 결함 신호  $p(x_m, y_m, z_m; t)$  및 순음 성분  $p_{f_{h_i}}(x_m, y_m, z_m; t)$  를 각각 푸리에 변환한 결과를 나타낸다. 식 (6)에서 각각의 순음 성분에 의한 음장  $P_{f_{h_i}}(x_m, y_m, z_m; f)$  을 분리해 내는 대역 통과 여파기(Band pass filter)를 이용하면 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법을 통해 각 순음 성분에 대해 음장을 가시화할 수 있다. 그러면 대역 통과 여파기를 어떻게 설계할지 생각해 보자. Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이, 이동하는 주기적인 충격 신호는 주파수 영역에서 중심 주파수  $f_{h_i} = i / \Delta T$  를 갖는 협대역 신호들의 조합으로 표현

된다. 각각의 협대역 신호는 순음 성분  $f_{hi} = i/\Delta T$  를 갖는 신호가 도플러 효과에 의해 변조된 결과를 나타내며, 이 스펙트럼은 각각  $(1-2M)f_{hi}$  와  $(1+2M)f_{hi}$  사이의 값을 갖는다[9]. 여기서  $M$  은 마하 수를 나타낸다. 이를 이용하면 각 밴드를 통과시키는 대역 통과 여파기를 다음과 같이 정의할 수 있다:

$$B_i(f) = \begin{cases} 1 & (1-2M)\frac{i}{\Delta T} < f < (1+2M)\frac{i}{\Delta T} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

이를 이용하면, 부대역 겹침 현상[9]이 발생하지 않는 다음의 주파수 범위 내에서 결함에 의한 음장을 오차 없이 가시화할 수 있다:

$$f_{hi} < \frac{1-2M}{4M} \frac{1}{\Delta T}. \quad (8)$$

식 (7)을 식 (6)에 적용하면

$$B_i(f)P(x_m, y_m, z_m; f) = P_{f_{hi}}(x_m, y_m, z_m; f) \quad (9)$$

의 결과를 얻을 수 있다. 식 (9)를 역푸리에 변환하면 이동하는 순음 성분의 시간 신호를 얻을 수 있고, 식 (5)를 적용하여 중심 주파수  $f_{hi}$  에 대한 홀로그래프를 얻을 수 있다. 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같다:

$$F_T^{-1}\{B_i(f)P(x_m, y_m, z_m; f)\}/\Delta f = P_h(x_h, y_h, z_h; f_{hi})e^{-j2\pi f_{hi}t} \quad (10)$$

이러한 과정을 각 중심주파수에 대해 반복하면 각각의 주파수에 대해 여러 장의 홀로그래프를 얻을 수 있다.

## 4. 잡음의 영향을 제거하는 방법

### 4.1 홀로그래프 평균을 통한 잡음의 영향 감소

3 장에서 이동하는 차량의 베어링 신호를 대역 통과 여파기를 이용하여 가시화하는 방법에 대해 다루었다. 그러나 식 (10)까지의 과정에선 잡음의 영향을 고려하지 않았다. 실제로 잡음은 항상 존재하며, 신호 대 잡음비가 낮을 경우 잡음에 의해 결함의 위치를 찾지 못할 위험이 있다. 따라서 잡음이 있는 경우 음원의 위치를 추정하는 방법이 필요하다. 여기서 잡음은 베어링 결함 신호 이외의 모든 신호를 뜻하며, 배경 잡음은 물론 차량의 다른 부위에서 발생하는 소음 또한 포함한다.

잡음이 섞인 이동하는 주기적인 충격 신호  $P_n(x_m, y_m, z_m; f)$  를 식 (9),(10)을 이용해 표현하면

$$F_T^{-1}\{B_i(f)P_n(x_m, y_m, z_m; f)\}e^{j2\pi f_{hi}t} = P_h(x_h, y_h, z_h; f_{h0})\Delta f + F_T^{-1}\{B_i(f)N(x_m, y_m, z_m; f)\}e^{j2\pi f_{hi}t}\Delta f \quad (11)$$

과 같이 된다. 여기서  $N(x_m, y_m, z_m; f)$  는 측정 잡음을 푸리에 변환한 결과이다. 좌변은 측정된 후 신호 처리를 통해서 얻게 되는 결과이며, 우변의 첫 번째 항은 홀로그래프, 두 번째 항은 잡음에 의한 오차를 나타낸다. 따라서 최종적으로 얻게 되는 홀로그래프에는 결함에 의한 성분과 잡음에 의한 성분이 동시에 나타나게 된다.

우선 배경 잡음의 영향을 없애는 방법에 대해 생각해 보자. 잡음의 영향을 줄이는 방법 중 하나로 주기적

인 결함 신호와 잡음의 특성 차이를 이용하는 것이 있다. 베어링 결함 신호는 여러 개의 이산화된 주파수로 이루어져 있으므로 다양한 주파수에 대해 홀로그래프를 얻을 수 있다. 이 홀로그래프들은 모두 소음원에서 직접 방사된 음장과 잡음에 의해 공간에 랜덤하게 분포된 음장의 합으로 표현된다. 전자의 경우 동일한 소음원에 의해 얻은 홀로그래프이므로 홀로그래프의 주파수에 상관없이 음원 즉, 베어링이 위치한 곳에서 가장 큰 음압을 가진다. 따라서 각 홀로그래프들끼리 평균을 취하더라도 음압이 가장 큰 위치는 변하지 않는다. 그러나 잡음의 경우 주파수 별로 공간 분포가 랜덤하게 표현된다. 이들을 평균을 취하면 랜덤 오차가 줄어들어 잡음의 영향은 줄어들게 된다. 이러한 관계를 이용한다면 홀로그래프간의 평균을 통해서 잡음 및 반사파의 영향을 줄인 채 소음원의 위치를 찾을 수 있다[14].

그러면 이러한 주론을 수학적으로 증명해 보자. 홀로그래프 좌표의  $x_h = \Delta x, y_h = \Delta y, z_h = 0$  에 단극 음원이 있는 경우 식 (11)을  $N_a$  개의 주파수에 대해 음원면 ( $z_h = 0$ )에서 평균한 결과를  $P_{N_a}(x_h, y_h, 0)$  이라고 정의하면,  $N_a$  가 커질수록 잡음의 평균 결과는 0 으로 수렴한다. 따라서 식 (11)을 다시 쓰면

$$P_{N_a}(x_h, y_h, 0) \approx \frac{\Delta f}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} P_h(x_h, y_h, 0; f_{hi}) \quad (12)$$

와 같이 쓸 수 있다. 음원의 형태를 단극 음원으로 가정하였으므로 식 (12)는 다시

$$P_{N_a}(x_h, y_h, 0) \approx \frac{\Delta f}{N_a} \frac{1}{R} \sum_{i=1}^{N_a} A_0(f_{hi})e^{jk_{hi}R} \quad (13)$$

과 같이 쓸 수 있다. 여기서  $A_0(f_{hi})$  는 주파수 별 단극 음원의 크기,  $R$  은 음원과 홀로그래프 좌표의  $(x_h, y_h, 0)$  사이의 거리를 나타낸다:

$$R = \sqrt{(x_h - \Delta x_h)^2 + (y_h - \Delta y_h)^2}. \quad (14)$$

식 (13)에서  $1/R$  은  $x_h = \Delta x_h, y_h = \Delta y_h$  에서 무한히 커진다. 따라서 식 (11)은 음원의 위치에서 최대가 된다는 사실을 알 수 있다.

### 4.2 부분 음장 분해를 이용한 결함 신호와 잡음의 분리

만약 잡음이 4.1 절에서 언급한 경우와는 달리 공간 상에 랜덤하게 분포되어 있지 않은 경우 평균을 통해 잡음의 영향을 줄일 수가 없다. 예를 들어 자동차 베어링의 결함 신호가 자동차 엔진 소리와 함께 측정되는 경우를 생각하자. 자동차의 엔진에서 발생하는 소음은 공간에 랜덤하게 분포해 있지 않다. 이러한 경우 4.1 절에서 접근하였던 것처럼 베어링 결함 신호와 잡음의 또 다른 특성을 이용하여서 잡음의 영향을 줄이는 것을 꾀하여야 한다.

베어링 결함 신호와 엔진 신호의 근본적인 차이점 중 하나로 두 소음의 발생 원인이 다르다는 점을 꼽을 수 있다. 이처럼 발생 원인이 다른 음원을 독립 음원 (independent source)이라고 한다[15]. 이들 독립 음원에서 발생한 신호는 통계적으로 완전 비상관(incoherent)으로 간주되며, 따라서 두 신호 사이의 상호 스펙트럼 및 기여도 함수는 0 이다. 두 신호가 섞여 있을 때 두 신호 중 하나의 신호에 완전 상관인 신호를 알고 있으면 기여도 함수를 이용하여 두 신호의 스펙트럼을 분리할 수 있다[16]. 이러한 개념을 음향 홀로그래피에 확장하여

여러 개의 독립 음원이 있을 때 각각의 독립 음원 별로 홀로그래프를 따로 얻는 방법을 부분 음장 분해(Partial field decomposition, 참고 문헌 [17])라고 한다.

부분 음장 분해의 구체적인 이론에 대해서는 참고 문헌 17 에 자세히 언급되어 있다. 참고 문헌 17 에 의하면 본 방법은 동시 측정 혹은 단계적 측정 방법에 적용이 가능하다. 그러나 이 연구 결과를 이동 프레임 음향 홀로그래피에 적용하기에는 무리가 따른다. 그 이유로, 부분 음장 분해를 적용하기 위해선 하나의 독립 음원에 완전 상관인 신호와 다른 신호들 사이의 상호 스펙트럼을 측정해야 하는데, 이는 각각의 신호를 푸리에 변환하여 곱한 후, 앙상블 평균을 취하여 얻을 수 있다. 그러나 이동 프레임 음향 홀로그래피는 음원이 이동하는 동안 측정이 1 번만 이루어진다. 따라서 평균을 통해 상호 스펙트럼을 얻기 위해서는 측정을 여러 번 해야 한다. 이는 측정 횟수만큼 음원을 이동시켜야 하므로 비효율적이다.

그러면 비상관 음원의 다른 특성을 이용하여 둘 사이의 기여량을 분리해 낼 수는 없을까? 이에 대한 해답은 주파수 별 홀로그래프를 관찰하여 얻을 수 있다. Fig. 6 과 같이 서로 다른 스펙트럼을 갖는 독립 음원을 예로 생각해 보자. 두 독립 음원은 각각 여러 개의 이산화된 주파수 성분의 조합으로 이루어져 있다. 독립 음원은 발생 원인이 다르기 때문에 서로 다른 스펙트럼을 갖는다고 무리 없이 가정할 수 있다. 두 음원이 함께 이동하는 경우, 부엽 겹침 현상이 발생하지 않는 주파수 범위 내에서 각 주파수 별 홀로그래프를 얻을 수 있다.

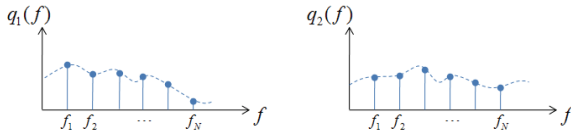


Fig. 6. Auto spectra of two independent sources.

그러면 두 독립 음원에 의해 형성된 홀로그래프의 주파수 별 특성은 어떨지 상상해 보자. 두 음원의 스펙트럼이 다르기 때문에 주파수 별로 두 음원이 형성한 음장의 형태는 다르다. 이에 대한 예로 Fig. 7 은 2 개의 주파수에 대해 두 독립 음원이 형성한 홀로그래프를 보여준다.

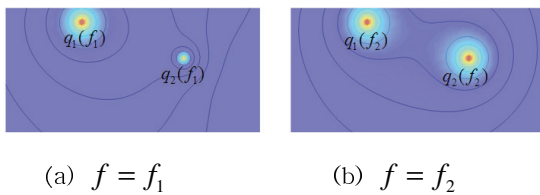


Fig. 7. Holograms due to two independent sources at two different frequencies

따라서 두 독립 음원에 의해 형성된 홀로그래프는 주파수에 대해서도 역시 독립이라고 할 수 있다. 이를 이용하면 각 주파수 별 홀로그래프를 개별적인 앙상블로 간주할 수 있고, 따라서 부분 음장 분해 방법을 적용할 수 있을 것이다. 이를 수학적으로 표현해 보자.

두 독립 음원에 의해 형성된 홀로그래프를 각각  $P_{h1}, P_{h2}$  라고 하고, 측정된 홀로그래프를

$$P_h(x_h, y_h, z_h; f_{hi}) = P_{h1}(x_h, y_h, z_h; f_{hi}) + P_{h2}(x_h, y_h, z_h; f_{hi}) \quad (15)$$

라 하자. 이 중  $P_{h1}$  이 베어링 결함에 의한 소음이라고

하자. 식 (15)는  $x_h = \Delta x_h, y_h = \Delta y_h$  에서 최대를 가지며, 이 점에서의 음압은  $P_{h1}(x_h, y_h, z_h; f_{hi})$  의 모든 점에서의 음압과 완전 상관이라고 하고, 이를  $P_{\max}(f_{hi})$  라고 정의하자:

$$P_{\max}(f_{hi}) = P_h(\Delta x_h, \Delta y_h, z_h; f_{hi}) \approx P_{h1}(\Delta x_h, \Delta y_h, z_h; f_{hi}) \quad (16)$$

부분 음장은 최대값의 자기 스펙트럼에 대한 최대값과 홀로그래프 사이의 상호 스펙트럼의 크기의 제곱의 비로 정의된다[17]. 이를 본 연구의 경우에 적용하여 얻은 부분 음장을  $C_1(x_h, y_h, z_h)$  라고 정의하자. 그러면

$$C_1(x_h, y_h, z_h) = \frac{E[P_{\max}^*(f_{hi})P_h(x_h, y_h, z_h; f_{hi})]}{E[|P_{\max}(f_{hi})|^2]} \quad (17)$$

과 같이 쓸 수 있다.  $P_{\max}(f_{hi})$  는  $P_{h1}(x_h, y_h, z_h; f_{hi})$  에 완전 상관이므로  $P_{h2}(x_h, y_h, z_h; f_{hi})$  에 완전 비상관이다. 따라서 식 (17)은

$$C_1(x_h, y_h, z_h) \approx \frac{E[P_{\max}^*(f_{hi})P_{h1}(x_h, y_h, z_h; f_{hi})]}{E[|P_{\max}(f_{hi})|^2]} \quad (18)$$

과 같이 쓸 수 있다. 식 (13)에서 언급한 대로 베어링 신호를 단극 음원으로 모델링하고, 기대값을 계산하기 위해  $N_a$  개의 주파수에 대한 평균을 취하면 식 (18)은

$$C_1(x_h, y_h, z_h) \approx \frac{1}{N_a R^2} \frac{\left| \sum_{i=1}^{N_a} |A(f_{hi})|^2 e^{jk_{hi}(R_h - z_h)} \right|^2}{\sum_{i=1}^N |A(f_{hi})|^2} \quad (19)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식 (19)는 2 가지 경우로 나누어 관찰할 수 있다. 우선  $R = z_h$  즉,  $x_h = \Delta x_h, y_h = \Delta y_h$  인 경우 식 (19)는  $\frac{1}{N_a z_h^2} \sum_{i=1}^{N_a} |A(f_{hi})|^2$  가 된다. 반면,

$R \neq z_h$  즉,  $x_h \neq \Delta x_h$  또는  $y_h \neq \Delta y_h$  일 때 식 (19)는  $N_a$  가 커질수록 0 으로 수렴하게 된다. 한편, 베어링 결함 신호를 나타내는  $P_{h1}(x_h, y_h, z_h; f_{hi})$  의 크기를 제공하여  $N_a$  개의 주파수에 대해 평균을 취하면

$$\frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} |P_{h1}(x_h, y_h, z_h; f_{hi})|^2 = \frac{1}{N_a R^2} \sum_{i=1}^{N_a} |A(f_{hi})|^2 \quad (20)$$

과 같다. 이는  $x_h = \Delta x_h, y_h = \Delta y_h$  에서

$$\frac{1}{N_a z_h^2} \sum_{i=1}^{N_a} |A(f_{hi})|^2 \text{ 의 값을 가지며, 이는 식 (19)에서}$$

$x_h = \Delta x_h, y_h = \Delta y_h$  인 경우와 같다. 그리고  $z_h$  가 매우 작다면 즉, 음원면에서 음압을 관찰하는 경우  $x_h = \Delta x_h, y_h = \Delta y_h$  에서의 성분이 지배적이며 나머지 위치에서는 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서

$$\lim_{z_h \rightarrow 0} C_1(x_h, y_h, z_h) \approx \lim_{z_h \rightarrow 0} E[|P_{h1}(x_h, y_h, z_h; f_{hi})|^2] \quad (21)$$

와 같이 쓸 수 있다. 정리하면, 부분 음장 분해를 이동하는 음원에 대해 하나의 주파수에 대해 적용하는 것은 힘들지만, 개별 음원이 주파수에 대해서도 독립이라는 사실을 이용하여 여러 개의 이산화된 주파수 성분을 갖는 이동 음원에 적용할 수 있다. 이를 통해 이동하는 다수의 소음원들의 기여량을 분리해 내거나, 독립 음원의 위치를 개별적으로 찾을 수 있다.

## 5. 축소 모형 실험을 통한 검증

본 장에서는 앞서 다룬 잡음 제거 이론, 이동 음원의 부분 음장 분해 방법을 검증하기 위해 수행한 실험 결과를 보여 준다. 이동하는 차량을 모사할 수 있는 축소 모형 장치를 이용하여 실험을 수행하였다.

### 5.1 실험 장치

Fig. 8(a)는 축소 모형 장치의 사진을 보여 준다. 길이 3m, 폭 0.5m의 레일 위를 모터로 작동되는 모형 차량이 정속으로 이동하면서 스피커를 통해 충격 소음 및 잡음을 발생시킨다. Fig. 8(b)는 실험에 사용한 모형 차량의 사진을 보여 준다. 모형 차량에는 2개의 스피커가 설치되어 있으며, 각각 베어링 결합 신호(주기적인 충격 신호) 및 측정 잡음을 발생시킨다. 사용한 스피커는 Sammi 사의 SR-165A50이며, 외경은 16.5cm, 사용 가능 주파수는 77.1Hz 이상이다.

이동하는 충격 소음을 측정하기 위한 마이크로폰 어레이는 레일 하부 프레임에 설치되어 있다(Fig. 9). 사용한 어레이 마이크로폰은 B&K type 4935 (5.5mV/Pa, 20kHz.)이며, 총 18개를 사용하였다. 어레이 지그는 지면에 의한 반사파를 분리하기 위해 수직 방향으로 10cm의 간격을 두고 2개를 설치하였다. 하나의 어레이에 설치된 마이크로폰 수는 9개이며, 마이크로폰의 간격은 관심 상한 주파수를 1 kHz로 선정할 경우 한 파장 안에 적어도 4개의 측정점을 두기 위해 8cm로 정하였다. 따라서 어레이의 크기는 64cm이다. 이는 음원인 스피커를 충분히 포함하는 크기이다.

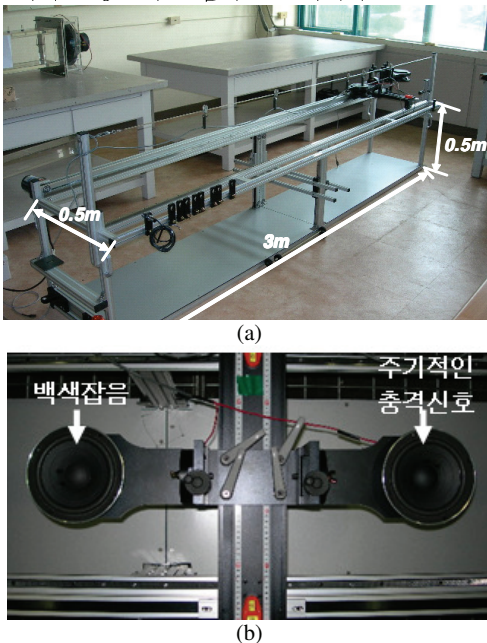


Fig. 8 The miniature vehicle system: (a) the overall view, (b) top view of miniature vehicle

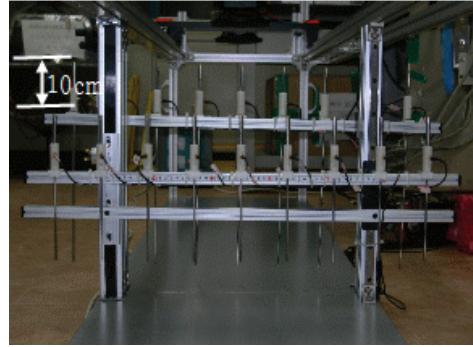


Fig. 9 Two linear microphone arrays

### 5.2 실험 결과

1절에 언급한 장치를 이용하여 우선 잡음과 주기적인 충격 소음이 동시에 존재할 때 주기적인 충격 소음을 가시화하는 실험을 수행하였다. 8(b)와 같이 왼쪽의 스피커에서는 백색 잡음을, 오른쪽 스피커에서는 주기적인 충격 신호를 발생시켰다. 충격 주기는 0.1초이며, 이동 속도는 35cm/sec로, 마하 수는 약 0.001이다.

Fig. 10은 두 번째 어레이의 4번째 마이크로폰에서 측정된 시간 신호를 보여 준다. Fig. 10을 보면 전 시간 구간에 걸쳐 도플러 효과로 인해 포락이 형성됨을 알 수 있다. 모형 차량이 오른쪽으로 이동하고, 초기 상태에서 마이크로폰 어레이는 모형 차량의 오른쪽에 있기 때문에, 충격 신호가 먼저 측정되고, 그 다음으로 백색 잡음이 측정된다.

Fig. 11은 2개의 주파수에 대해서 후방 예측을 통해 음원면의 음장을 예측한 결과이다. 그림을 살펴보면 충격 소음원(오른쪽 스피커) 뿐만 아니라 백색 잡음(왼쪽 스피커)에 의한 신호 역시 가시화되었음을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 배경 잡음으로 인해 두 스피커 이외의 위치에서도 음압이 있는 것처럼 보인다. 이러한 부분은 주기적인 충격 소음원의 위치를 찾는 데 오차로 작용하게 된다. 우선 배경 잡음의 영향을 없애기 위해 주파수별 홀로그램을 평균을 취하였고, Fig. 12는 300Hz - 1000Hz 사이의 홀로그램을 평균한 결과를 보여 주고 있다. Fig. 12를 관찰해 보면 Fig. 11의 각 주파수별 홀로그램을 관찰한 것에 비해 배경 잡음의 영향이 줄어들었고, 오른쪽 스피커의 위치에서 최대값을 가진다는 사실을 알 수 있다. 왼쪽 스피커에서도 음원의 위치가 어느 정도 탐지되는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 백색 잡음이 모든 주파수 성분을 가진 신호이기 때문이며, 역시 주파수에 상관없이 동일한 위치에서 최대가 되기 때문이다. 따라서 홀로그램 평균을 통해 공간에

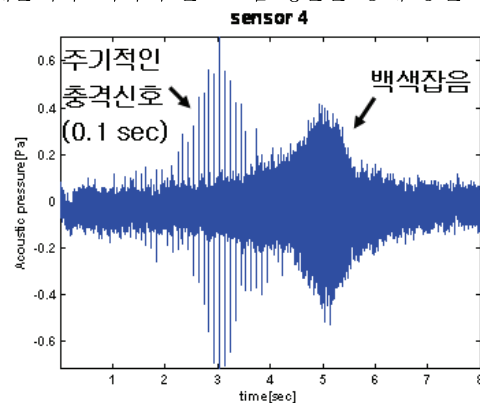


Fig. 10 Sound pressure measured at 4<sup>th</sup> microphone of 1<sup>st</sup> array

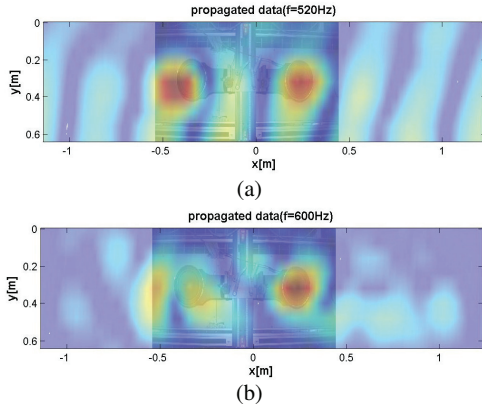


Fig. 11 Sound visualization results at (a)f=520Hz, (b)f=600Hz

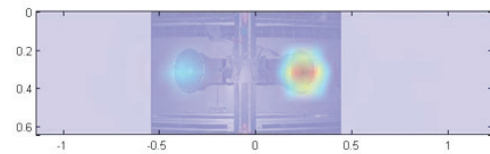


Fig. 12 The averaged hologram for frequencies within 300~1000Hz

랜덤하게 위치하는 잡음은 없앨 수 있지만 왼쪽 스피커 통해 발생하는 백색 잡음의 영향은 완전히 제거할 수 없다. 이를 위해 부분 음장 분해 방법을 이용하여 두 신호의 분리를 시도하였다. 그 결과를 Fig. 13에 담았다. 우선 Fig. 13(a)는 홀로그램 평균 결과이다. 이 결과로부터 최대값 즉, 임의의 신호에 완전 상관인 신호의 위치를 찾아낸다. 본 실험의 경우 주기적인 충격 소음이 발생한 위치에서 최대값이 발생하였다. 이 곳에서의 음압과 각 주파수 별 홀로그램 상의 음압 사이의 상호 스펙트럼을 구한 값을 최대값에서의 자기 스펙트럼으로 나누어 첫 번째 부분 음장을 구한다(Fig. 13(b)). 이 결과를 통해 전체 음장의 평균값에서 주기적인 충격 소음원의 기여량을 분리해 내었음을 알 수 있다. 홀로그램 평균 결과에서 첫 번째 기여량을 뺀 나머지 값을 Fig. 13(c)에 나타내었으며, 본 실험에서는 2 개의 독립 음원이 존재하므로 Fig. 13(c)의 결과는 나머지 1 개의 음원에서 발생한 음장을 나타낸다. 따라서 Fig. 13(c)의 결과가 곧 2 번째 부분 음장이 된다. 따라서 Fig. 13(c)의 음장으로부터 얻어낸 부분 음장은 Fig. 13(d)와 동일하며, 여기서 나머지 음장은 음압이 0 이다. 정리하면, 본 축소 모형 실험을 통해서 앞 절에서 제안한 이론(반사파 제거, 잡음 제거, 부분 음장 분해)을 실제로 적용할 수 있음을 보여 줬다.

## 6. 결론

본 연구에서는 베어링 결함이 충격 소음을 발생시킨다는 점에 감안하여 마이크로폰 어레이를 이용한 충격 위치를 추정하는 방법에 대해 다루었다. 차량이 이동하면서 소음을 발생하기 때문에 이동하는 소음원을 가시화하는 방법인 이동 프레임 음향 홀로그래피를 이용하여 적용 가능성을 검증하였다. 이동 프레임 음향 홀로그래피를 적용하기 위하여 주기적인 충격 소음을 여러 개의 이산화된 주파수 성분의 조합으로 표현하여 이동 프레임 음향 홀로그래피의 적용이 가능함을 보였다. 그리고 잡음의 영향을 제거하는 방법으로 여러 개의 주파수 성분에 대해 홀로그램을 구한 뒤, 이들을 평균하는

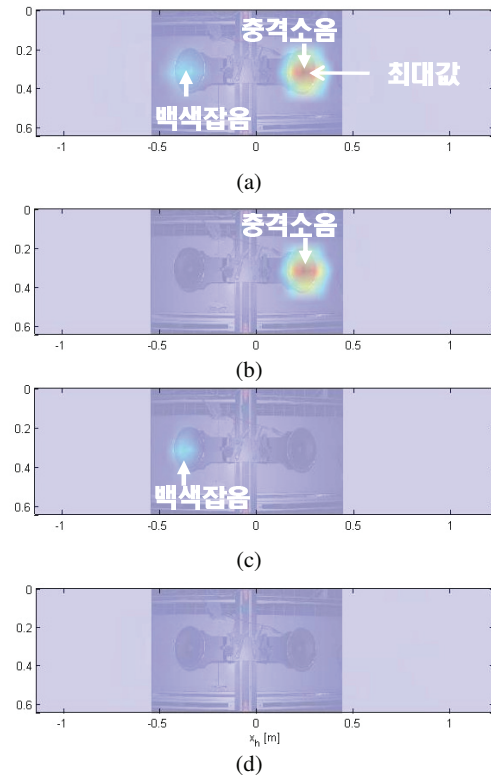


Fig. 13 The partial field decomposition results: (a) averaged hologram, (b) 1<sup>st</sup> partial field(periodic impulse), (c) 2<sup>nd</sup> partial field(white noise), (d) the remained field

방법을 제안하였다. 이는 주기적인 충격 소음이 여러 개의 이산화된 주파수 성분을 가진다는 사실에 근거하였으며, 공간상에 랜덤하게 분포한 잡음을 평균을 취하면 0 으로 수렴한다는 사실을 이용한 것이다. 또한 부분 음장 분해 방법을 본 연구에 적용하여 베어링 결함 신호와 잡음의 기여량을 분리해 낼 수 있음을 증명하였다. 제안한 이론을 검증하기 위해 축소 모형 실험을 진행하였으며, 홀로그램 평균을 통해 배경 잡음의 영향을 줄이고, 부분 음장 분해를 통해 주기적인 충격 소음과 백색 잡음의 기여량을 분리해 낼 수 있음을 검증하였다.

## 후 기

본 연구는 교육부의 두뇌 한국 21(BK21) 프로그램 및 한국 철도 기술 연구원(KRRI)의 지원 하에 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) [http://railnuri.wsu.ac.kr/rail/techency/t\\_5\\_32.htm](http://railnuri.wsu.ac.kr/rail/techency/t_5_32.htm) (철도 시설 전문 인력 육성 사업단 홈페이지의 철도 기술 백서에 실린 내용을 참고하였음)
- (2) C.-S. Park, Y.-C. Choi, Y.-H. Kim, "Early faults detection in a ball bearing using minimum variance cepstrum; application to an automotive hub bearing," ICSV13, Vienna, Austria, July 2-6 (2006).
- (3) T.S. Graham, "Long-wavelength acoustic holography," 77<sup>th</sup> acoustical society of America, 46(1), 116, 1969.
- (4) E. G. Williams, J. D. Maynard, and E. Skudrzyk, "Sound source reconstructions using a microphone array," J. Acoust. Soc. Am. 68(1), 340-344, 1980.
- (5) Y.-H. Kim, "Can we hear the shape of a noise source?,"

- Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14(7), pp.586-603, 2004.
- (6) Thomas D. Rossing (Ed.), *Springer Handbook of Acoustics* (Springer New York, 2007), chapter 26.
  - (7) M. B. S. Magalhães, and R. A. Tenenbaum, "Sound sources reconstruction techniques: a review of their evolution and new trends," *Acta Acustica united with Acustica*, 90(2), 199-220, 2004.
  - (8) J. Hald, "STSF – a unique technique for scan-based near-field acoustic holography without restrictions on coherence," B&K Technical Review No .1, 1989.
  - (9) H.-S. Kwon and Y.-H. Kim, "Moving frame technique for planar acoustic holography," *J. Acoust. Soc. Am.* 103(4), 1734-1741, 1998.
  - (10) S.-H. Park and Y.-H. Kim, "An improved moving frame acoustic holography for coherent bandlimited noise," *J. Acoust. Soc. Am.* 104(6), 3179-3189, 1998.
  - (11) Y.-H. Kim, B. D. Lim, and W. S. Cheoung, "Fault detection in a ball bearing system using a moving window," *Mechanical Systems & Signal Processing*, 5(6), 461-473, 1991.
  - (12) P. D. McFadden and M. M. Toozhy, "Application of synchronous averaging to vibration monitoring of rolling element bearings," *Mechanical Systems & Signal Processing*, 14(6), 891-906, 2000.
  - (13) A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer, J.R. Buck, *Discrete-Time Signal Processing, second Ed.* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1999).
  - (14) J.-H. Jeon and Y.-H. Kim, "Localization of moving periodic impulsive source in a noisy environment (L)," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(3), 753-759, 2008.
  - (15) 남경욱, 낮은 상관 관계를 갖는 음장에서 음향 홀로그래피의 적용 (한국과학기술원 기계공학과 박사 학위 논문, 2004), Ch. 2.
  - (16) J. S. Bendat and A. G. Piersol, *Random data: Analysis and Measurement Procedures*, 3<sup>rd</sup> Ed. (John Wiley&Sons Inc. 2000).
  - (17) K.-U. Nam, Y.-H. Kim, "A partial field decomposition algorithm and its examples for near-field acoustic holography," *J. of Acoust. Soc. Am.* 116, 172-185, 2004.